

Прочностные показатели торкрета в сравнении
с показателями обычного раствора того же состава

| № п/п | Наименование | Со- став по весу | В/Ц | Предел прочности при сжатии, МПа в возрасте, суток | | | Предел прочности при изгибе, МПа в возрасте, суток | | |
|----------|--------------------------------|---------------------------|------|----------------------------------------------------------|------|------|----------------------------------------------------------|-----|------|
| | | | | 3 | 7 | 28 | 3 | 7 | 28 |
| 1. | Торкрет без добавки | 1:2,95 | 0,38 | 16,0 | 23,0 | 45,7 | 4,6 | 6,1 | 9,4 |
| 2. | Торкрет с расширяющей добавкой | 1:3,1 | 0,39 | 25,5 | 32,1 | 48,4 | 5,3 | 6,7 | 10,7 |
| 3. | Раствор без добавки | 1:3 | 0,40 | 8,6 | 16,8 | 32,1 | 3,0 | 4,1 | 4,5 |
| 4. | Раствор с расширяющей добавкой | 1:3 | 0,40 | 17,0 | 22,4 | 34,8 | 3,4 | 4,8 | 5,3 |

Примечание: В опытах применялся портландцемент марки 400 и речной песок с $M_{кр} = 2,6$.

1.Дюженко М.Г., Ицксон Б.И. Экологизация системы оборудования природоохранных технологий в строительстве и промышленности строительных материалов // Сб. трудов науч.-практ. конф. "Межрегиональные проблемы экологической безопасности". – Сумы, 2002. – С.8-14.

2.Водовозов Н.П., Дюженко М.Г., Шутенко Л.Н., Немерцев В.С. Оптимизация торкретных работ на объектах водоканализационного строительства // Коммунальное хозяйство городов: Сб. науч. трудов. Вып.15. – К.: Техніка, 1998. – С.14-24.

3.Дюженко М.Г., Болотских О.Н., Водовозов Н.П., Мусин С.О. Лопастной питатель, повышающий устойчивость технологического режима ротационного бетономета при формовании плоских изделий // Науковий вісник будівництва. Вип.9. – Харків: ХДТУБА, 2000. – С.168-171.

4.Войтюк Ю.В., Третинник А.Н., Дюженко М.Г. Моделирование и расчет системы увлажнения при механическом торкретировании по "сухому" способу // Сб. трудов МОК'41. – Одесса: Астропринт, 2002. – С.61-62.

Получено 22.11.2004

УДК 624.012.35.044

Є.В.КЛИМЕНКО, О.А.ХАРЧЕНКО, кандидати техн. наук,
С.Л.ШАПОВАЛ, М.О.ОВСІЙ

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ КАМ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЇХ МІСЦЕВОМУ СТИСНЕННІ

Описано метод визначення міцності кам'яних конструкцій при їх місцевому стисненні, який базується на результатах експериментальних досліджень і моделюванні роботи таких елементів. При цьому враховується фактичний напружено-деформований стан та основні параметри, що впливають на міцність.

У практиці будівництва останнім часом усе ширше використовуються кам'яні конструкції оскільки вони мають ряд переваг над іншими, наприклад залізобетонними. Існуючі будівлі з таких матеріалів

часто підлягають реконструкції з влаштуванням нових довговічних перекриттів. При цьому виникають проблеми з визначенням міцності в місцях локального передавання навантаження з конструкцій перекриття на стіни та стовпи з кам'яної кладки.

У нормах [1] проблема визначення міцності кам'яних конструкцій при їх місцевому стисненні вирішена шляхом використання емпіричних залежностей, запропонованих для кам'яних конструкцій проф. Л.І.Онищиком ще в тридцятих роках ХХ ст. Ці пропозиції базуються на тому, що поздовжня сила сприймається не лише зоною кладки, розміщеною безпосередньо під площадкою стиснення, але й сусідніми ділянками кладки, створюючи ефект обойми. Такий підхід не відображає дійсний напружено-деформований стан конструкції, не враховує основні фактори, що впливають на міцність, та не дає можливості достовірно визначити міцність конструкції при її місцевому навантаженні.

У роботах [2-4] наводяться результати експериментальних досліджень фрагментів кам'яних конструкцій при їх місцевому стисненні, але не наводиться метод аналітичного визначення граничного навантаження або наводяться тільки рекомендації щодо розрахунку міцності лише для пружної стадії роботи конструкції, що не відповідає фактичній роботі конструкцій у момент руйнування.

Метою даної роботи є створення на основі експериментальних та теоретичних досліджень методу розрахунку кам'яних конструкцій при їх місцевому стисненні. Цей метод має базуватися на реальному напружено-деформованому стані елементів, враховувати вплив на міцність основних факторів і надавати можливість достовірно оцінювати граничне значення навантаження при місцевому стисненні кам'яних елементів.

При розробленні методу розрахунку міцності розглядалися плоско напружені елементи при їх місцевому завантаженні по усій ширині посеред стіни. Цей метод оснований на статичному принципі граничної рівноваги. Розглядаються плоскі елементи, які статично визначені відносно опорних реакцій. В якості статично однорідного поля (області) напружень приймається площа елемента. Ця площа розбивається на трикутні зони. При цьому активні і реактивні навантаження приймаються у вигляді ступеневих епюр σ і τ на границях кожної зони.

Необхідно відзначити, що принцип застосованого тут розбиття на зони без його теоретичного обґрунтування був запропонований М.Р.Нільсеном [5]. При побудові методу розрахунку за допомогою вищевикладеного методу було встановлено, що для класу плоских

елементів, які розглядаються, в пластичній стадії завжди можливе їх розбиття на трикутні зони з однорідними полями напружень, які знаходяться в рівновазі з навантаженням і між собою. Ці поля можуть мати на лініях стикування їх зон розриви тільки в тангенціальних напруженнях, що забезпечує їх рівновагу. На лініях стикування зон за умови рівноваги сусідніх полів їх контурні напруження σ і τ повинні бути безперервними. Також встановлено, що навіть при мінімальній кількості полів, елементи мають наскрізні стиснено-розтягнені зони, які є аналогами пластичних зон, де напруження σ_x , σ_y , τ_{xy} співпадають з реальними. Аналіз експериментальних і чисельних досліджень плоско напружених елементів та схем їх руйнування дозволив виявити їх дві основні властивості: всі елементи руйнуються по стиснено-розтягнених зонах, які найбільш навантажені. В цих зонах, які виникають уже в пружній стадії, поля напружень близькі до однорідних, з утворенням тріщин ця однорідність інтегрально зберігається.

Основні положення аналітичного розрахунку міцності елементів із цегляної кладки при місцевому стисненні, передумови та його етапи наступні:

- розглянемо модель цегляної кладки при завантаженні її рівномірно розподіленим навантаженням q_1 (рис.1) по усій товщині при прикладанні її посередині елемента. При цьому виділяється чотири зони: 1 – відсутні будь-які напруження; 2 – зона, в якій реалізується напружений стан – одноосне стиснення; 3 – зона двохосного стиснення; 4 – стиснуто-розтягнута зона;

- зовнішні активні і реактивні навантаження замінюються еквівалентними їм зосередженими або ступеневими епюрами σ і τ ;

- зовнішнє зусилля $P = q_{loc}b$ (b – ширина стінки) розкладається на дві складові – P_1 і P_2 . Зусилля $P_2 = P \cos^2 \alpha$ сприймається зоною двохосного стиснення 3, а зусилля $P_1 = P \sin^2 \alpha$ діє через стиснену кусково-однорідну зону на стиснено-розтягнену зону 4 (α – кут клину (рис.1)). Зусилля P_1 є причиною зминання кам'яної кладки зони 3, а зусилля P_2 разом з іншими внутрішніми зусиллями – причиною зминання-розколу або зминання-зсуву зони 4;

- використовуємо основні моделі руйнування елементів: від зминання-зсуву та зминання-розколювання.

Розрахунок міцності елементів з цегляної кладки будемо виконувати для кожної моделі руйнування окремо. На рис.2 показана розрахункова схема, яка описує характер руйнування від зминання-зсуву.

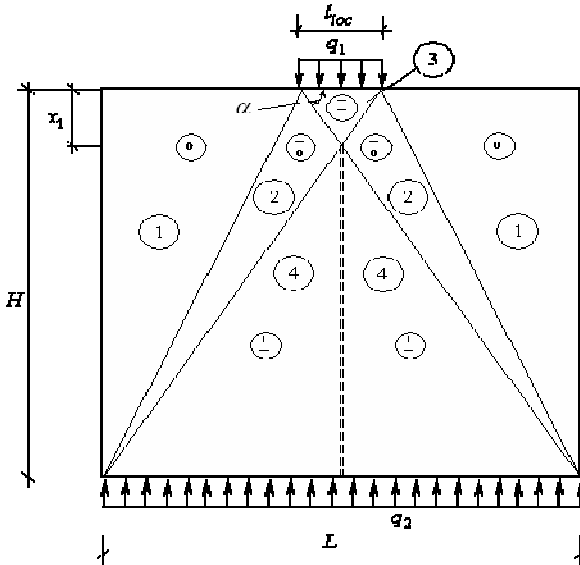


Рис.1 – Розбиття елемента на трикутні зони з однорідними полями напружень:

1 – нульова зона; 2 – зона одноосного стиснення; 3 – зона двохосного стиснення; 4 – стиснуто-розтягнута зона.

Розглядаючи дану розрахункову схему отримаємо наступні невідомі величини: P_1 ; P_2 ; τ_{sq1} ; σ_c ; τ_{sq2} ; σ_t ; x_1 , тобто всього сім невідомих.

Для визначення цих невідомих та розв'язку задачі міцності (знаходження граничного зовнішнього навантаження) необхідно мати стільки ж рівнянь. Розглянемо їх. Оскільки зовнішнє навантаження q_1 замінено еквівалентним зосередженим навантаженням, то

$$P_1 + P_2 + P_2 = q_1 l_{loc} b . \quad (1)$$

Сума проекцій усіх зовнішніх сил та внутрішніх зусиль на вісь X повинна дорівнювати нулю:

$$\sum X = 0 . \quad (2)$$

Усі зовнішні сили та внутрішні зусилля, спроектовані на вертикальну вісь повинні урівноважуватися:

$$\sum Y = 0 . \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &\leq R; \\ \sigma_t &\leq \gamma_t R_t; \\ \sigma_{sq_1} &\leq \gamma_{sq} R_{sq}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Оскільки теорія міцності кам'яної (у тому числі цегляної) кладки на даний час не розроблена, то у виразі (4) значення коефіцієнтів умов роботи γ_t і γ_{sq} приймаються на підставі аналізу експериментальних даних. Для середніх марок цегли та розчину, які найбільш масово використовуються для виготовлення конструкцій, для даної схеми руйнування рекомендується приймати: $\gamma_t = 0,85$; $\gamma_{sq} = 0,9$.

Розв'язавши сумісно рівняння рівноваги і допоміжні умови міцності, знаходимо залежності між зовнішніми зусиллями та внутрішніми напруженнями і, як результат, граничне значення зовнішнього навантаження.

Умову міцності в граничному стані можна записати у вигляді функції

$$F(\sigma_c; \sigma_t; \tau_{sq}; L; H; x_1; P_2) = 0. \quad (5)$$

Для конструкцій (елементів) з цегляної кладки, що працюють на місцеве стиснення по всій ширині посеред стіни і мають характер руйнування від зминання-зсуву, умови міцності записуються у вигляді:

$$N_1 = (1 + (2x_1 / l_{loc})^2) b(\sigma_t L + \tau_{sq} (2H - x_1) + \sigma_c l_{loc}), \quad (6)$$

де $N_1 = q_1 l_{loc} b$; x_1 – висота клину під штампом навантаження на елемент; τ_{sq} – напруження зрізу, що діє по лінії розриву зон; l_{loc} – довжина площадки завантаження; b – ширина елемента із цегляної кладки; σ_t – напруження розтягу по перев'язаному перерізу, що діє по зонах розриву сусідніх зон 2 та 4; σ_c – напруження стиснення кладки, що діє перпендикулярно до площини зон (площадок) розриву; L, H – відповідно довжина та висота елемента із цегляної кладки.

Із сумісного вирішення рівняння $F = 0$ і умов міцності знаходимо значення граничного місцевого навантаження, що діє на елемент із цегляної кладки по всій ширині посеред стіни, залежно від міцності матеріалу елемента і його розмірів $N = f(R, R_t, R_{sq}, L/H)$.

Міцність конструкції (елемента) із цегляної кладки, що працює на місцеве стиснення по всій ширині посеред стіни, визначається за наступною залежністю:

$$N_1 = \left[1 + \left(\frac{2x_1}{l_{loc}} \right)^2 \right] b \left[0,85R_t L + 0,9R_{sq} (2H - x_1) + Rl_{loc} \right]. \quad (7)$$

Проаналізувавши залежність висоти клину x_1 від факторів, які на неї впливають (такими виявились висота елемента H та довжина площадки завантаження l_{loc}), встановлено, що $x_1 = 0,24H \sqrt{l_{loc} / H}$. Використовуючи цю залежність, вдалося різко спростити розрахунок, оскільки відповідно до вказаних вище геометричних характеристик можна зразу визначити висоту клина, а значить і його кут α , що в свою чергу дає можливість розділити рівняння і значно спростити розв'язок системи.

Розрахункова схема, що описує руйнування типу зминання–розколювання, показана на рис.3.

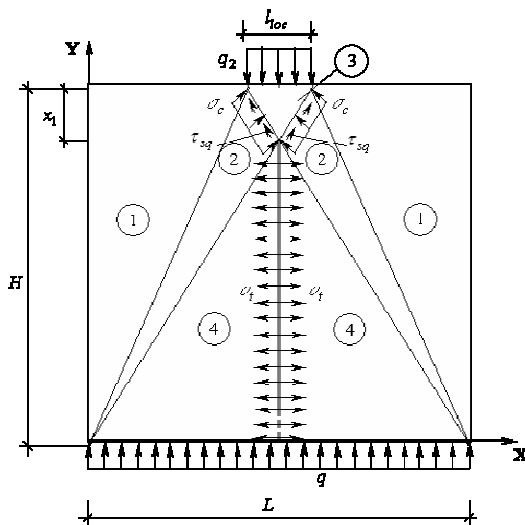


Рис.3 – Розрахункова схема елементів, які мають характер руйнування від зминання-розколювання

При прийнятті даної розрахункової схеми маємо п'ять невідомих: q_2 , τ_{sq} , σ_c , σ_t , x_1 . Для вирішення задачі міцності необхідно розглянути п'ять рівнянь.

Сума проєкцій усіх сил на вісь X повинна дорівнювати нулю:

$$\sum X = 0. \quad (8)$$

Проекції усіх сил на вісь Y повинні урівноважуватись:

$$\sum Y = 0. \quad (9)$$

Умови міцності:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &\leq \gamma_c R; \\ \sigma_t &\leq R_t; \\ \tau_{sq} &\leq \gamma_{sq} R_{sq}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Взаємозв'язок між напруженнями σ_c , σ_t та τ_{sq} виразимо через відповідні коефіцієнти умов роботи (10). На підставі аналізу експериментальних досліджень і чисельного моделювання МСЕ зроблено висновки, що для найбільш розповсюджених матеріалів середньої міцності можна прийняти $\gamma_c = 1,11$; $\gamma_{sq} = 0,5$.

Умову міцності в граничному стані можна записати у вигляді:

$$F(\sigma_c; \sigma_t; \tau_{sq}; L; H; x_1; q_2) = 0. \quad (11)$$

Для конструкцій (елементів) з цегляної кладки, що працюють на місцеве стиснення по всій ширині посеред стіни і мають характер руйнування від зминання-розколювання, умова міцності записується у вигляді:

$$N_2 = \left(1 + (l_{loc} / (2x_1))^2\right) b \left(2\sigma_t (H - x_1) + \tau_{sq} l_{loc} + 2\sigma_c x_1\right), \quad (12)$$

де $N_2 = q_2 l_{loc} b$, інші позначення дивись (6).

Із сумісного розв'язку рівнянь рівноваги, тобто функції $F = 0$ та з урахуванням умов міцності визначаємо граничне навантаження при даній розрахунковій моделі руйнування від зминання-розколювання в граничному стані:

$$N_2 = 1,8b \left[R_t (H - x_1) + 0,5 R_{sq} l_{loc} + 1,11 R x_1 \right] \times \left[1 + \left(\frac{l_{loc}}{2x_1} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

Як і для першої розрахункової моделі, для спрощення розрахунків і в першому наближенні можна прийняти $x_1 = 0,24H \sqrt{l_{loc} / H}$.

Хід визначення міцності наступний:

– розбиваємо площину елемента з цегляної кладки, який завантажений одночасно по всій товщині посеред стіни, на трикутні зони з однорідними полями напружень. Виявляємо тип механізму руйнуван-

ня та зони, які він охоплює;

- виконуємо аналіз характеру руйнування елементів і приймаємо моделі руйнування;

- за вищенаведеними рекомендаціями шляхом розв'язку рівнянь рівноваги та з урахуванням умов міцності визначаємо граничне значення зовнішнього навантаження за обома розрахунковими схемами, тобто N_1 і N_2 ;

- за несучу здатність цегляної кладки при місцевому стисненні по всій ширині посеред стіни приймаємо менше з цих двох значень.

Запропонований метод розрахунку дає можливість описати роботу кам'яних конструкцій і визначити граничне навантаження. Порівняння теоретичних значень цього навантаження з отриманим у ході експериментальних досліджень говорить про хорошу збіжність результатів ($\bar{X} = 0,881$; $\sigma = 0,168$; $\nu = 0,191$), а значить – про можливість використання даного методу в практиці проектування.

У подальшому необхідно провести розширені експерименти з кам'яними конструкціями при інших схемах прикладання місцевого навантаження та дослідити умови міцності кладки при різних навантаженнях. На основі проведених досліджень розробити загальну методику розрахунку кам'яних конструкцій при місцевому їх стисненні.

1. СНиП II-22-81. Каменные и армокаменные конструкции. – М.: Стройиздат, 1983. – 40 с.

2. Клименко Є.В., Шаповал С.Л. Работа цегляної кладки при її місцевому стиску // Науковий вісник будівництва. Вип.23. – ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2003. – С.136-139.

3. Брусенцов Г.Н., Будрейка В.Э. Экспериментально-теоретические исследования фрагментов каменной кладки при плоском напряженном состоянии // Исследования и методы расчёта строительных конструкций и сооружений: Труды ЦНИИСК им В.А.Кучеренко. – М., 1985. – С.94-101.

4. Клименко Є.В., Шаповал С.Л. Експериментальні дослідження кам'яної кладки при її місцевому стиску // Галузеве машинобудування, будівництво: Зб. наук. праць. Вип.7. – Полтава: ПДТУ ім. Юрія Кондратюка, 2001. – С.58-63.

5. Maggear nepekortazsagasi Orsrages Szabrany MSZ 15023: 1 – 76. – Egitmenyek erotam Terverese Falazott orerkeutetek, s.22.

Отримано 16.11.2004